

Influencia del medio ambiente en los materiales de construcción

III. Dinámica salina

JOSE MANUEL FERNANDEZ PARIS

Prof. Núm. de Física

Jefe de la Sección de Química del Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, Madrid

1. EL TRANSPORTE SALINO

Las sales y la humedad son los dos factores que condicionan las alteraciones de los materiales de construcción.

Los citados materiales, bien de por sí —piedras y ladrillos—, bien una vez endurecidos —morteros y hormigones—, están estructurados por partículas sólidas granulares, separadas por un sistema poroso, que constituye el medio dinámico para el transporte de las disoluciones salinas procedentes del medio ambiente.

La motilidad de las sales a través de la red de poros es función de tres variables físico-climáticas: temperatura, humedad y condiciones de aireación.

La dinámica salina se efectúa mediante procesos de difusión, unas veces de naturaleza química: *difusión iónica*, otras de naturaleza física: *difusión capilar*.

1.1. La difusión iónica

Una característica de los iones es su movilidad en el seno de un disolvente, denominada generalmente “movilidad iónica”.

Los iones en su movimiento por la disolución que ocupan los poros de los materiales, se comporta como un sistema químico, que trata de buscar su equilibrio; y así tiende a reducir al mínimo el efecto de la concentración iónica impuesto a la disolución.

De acuerdo con esta Ley, debida a Le CHATELIER, cuando un material contiene disoluciones en su interior, las sales se dirigen desde los puntos de mayor concentración hacia aquéllos de concentración menor. Este tipo de transporte salino recibe el nombre de *difusión iónica*.

La velocidad con que se trasladan los iones depende de la concentración de la disolución, del gradiente de la misma, y de la temperatura.

GARRELS (1) ha estudiado los procesos de difusión, a la temperatura ambiente y presión atmosférica, en piedras calizas saturadas de agua. La intensidad de la penetración salina, así como su distribución, se patentizaban mediante el empleo de una disolución de permanganato potásico.

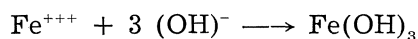
Una demostración clara del proceso de difusión iónica lo constituye la formación de anillos concéntricos de hidróxido férrico en las rocas silíceas alteradas, según el fenómeno que se denomina “anillos de LIESEGANG” (2).

La causa de los citados anillos son los fenómenos de precipitación rítmica, que acostumbra a darse en los coloides.

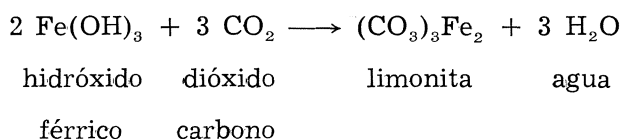
Si se prepara una placa de gelatina con una disolución acuosa de dicromato potásico y se inyecta en un punto de su masa, mediante una aguja hipodérmica y una fracción de disolución de nitrato de plata, se observará que alrededor del punto se forman anillos concéntricos de dicromato de plata de color rojo oscuro. A este tipo de precipitación zonal se le denomina en Química Coloidal “precipitación rítmica”.

A esta clase de fenómeno se debe la formación de las ágatas y los ónices, compuestos ambos de naturaleza silícea y con una marcada estructura zonal concéntrica.

Independientemente de las ágatas y ónices, existen otras rocas, también de naturaleza silícea, que presentan bandas muy acusadas de limonita, $(\text{CO}_3)_3\text{Fe}_2$, carbonato férrico. Su formación se debe a un cambio de pH: de carácter ácido a carácter básico, en la disolución que rellena un poro, dando lugar a la precipitación de los iones férricos disueltos en forma de hidróxido férrico, $\text{Fe}(\text{OH})_3$.



La posterior acción del dióxido de carbono, CO_2 , que accede hasta la masa de hidróxido férrico, lo transforma en carbonato de hierro, denominado en Mineralogía limonita:



1.2. Difusión capilar

Este tipo de transporte salino se verifica en piedras y materiales de construcción muy porosos, tales como las areniscas, ladrillos y hormigones, que permiten una gran movilidad a las disoluciones y humedades a través de sus poros capilares.

En numerosas areniscas se observa la presencia de bandas de color ocre, constituidas por óxido de hierro, Fe_2O_3 , dispuestas paralelamente respecto a la superficie de cantera o de ciertas fallas y oquedades, es decir, de zonas accesibles a las disoluciones salinas.

Por lo general, prevalece la difusión capilar sobre la iónica, y por ello las bandas, que constituyen los anillos, suelen ser muy finas, si bien pueden unirse para dar lugar a una banda estrecha.

2. PRESION OSMOTICA

Las moléculas de un cuerpo disuelto se mueven libremente en el seno de una disolución. Están separadas unas de otras por distancias que en las disoluciones diluidas son considerables comparadas con el diámetro molecular, lo que recuerda el comportamiento de las moléculas de los gases.

En 1887 VANT HOFF encontró una analogía entre la presión gaseosa y la ejercida por las moléculas de los cuerpos disueltos, sugiriendo que dichas moléculas deberían ejercer una presión osmótica correspondiente a aquella que ejercerían como gas eliminando el disolvente.

Con el nombre de ósmosis se denomina el paso de disolvente puro a través de una membrana semipermeable.

La presión osmótica de una disolución diluida se corresponde con aquella que ejercería el cuerpo disuelto si pudiera obtenerse como un gas a la temperatura del fenómeno y ocupara el mismo volumen que la disolución, es decir, que a la temperatura de 0°C una disolución que contiene un mol disuelto en 22,4 litros de disolución tiene una presión osmótica de 1 atmósfera.

En la figura III-1, las moléculas del disolvente puro procuran diluir la disolución interna más concentrada, atravesando la membrana semipermeable. El efecto sería igualar la concentración de ambas disoluciones. El fenómeno motiva una presión osmótica, P , contra las paredes del recipiente.

El valor cuantificado se obtiene mediante la expresión, debida a VAN'T HOFF y modificada por MAHAM (3):

$$P = \frac{R \cdot T}{V} \cdot n_2$$

en la que:

R = Constante universal de los gases = 0,082 litros · atm/°K · mol.

T = Temperatura expresada en °K.

V = Volumen de la disolución, expresado en litros.

n_2 = Número de moles de la sustancia disuelta en un litro de disolución.

P = Presión osmótica, expresada en atm.

En la figura III-2 se aprecia que cuando la disolución no llega a la saturación la presión osmótica es una función lineal de la concentración salina.

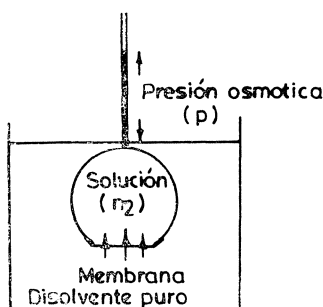


Fig. III-1.—Según MAHAN.

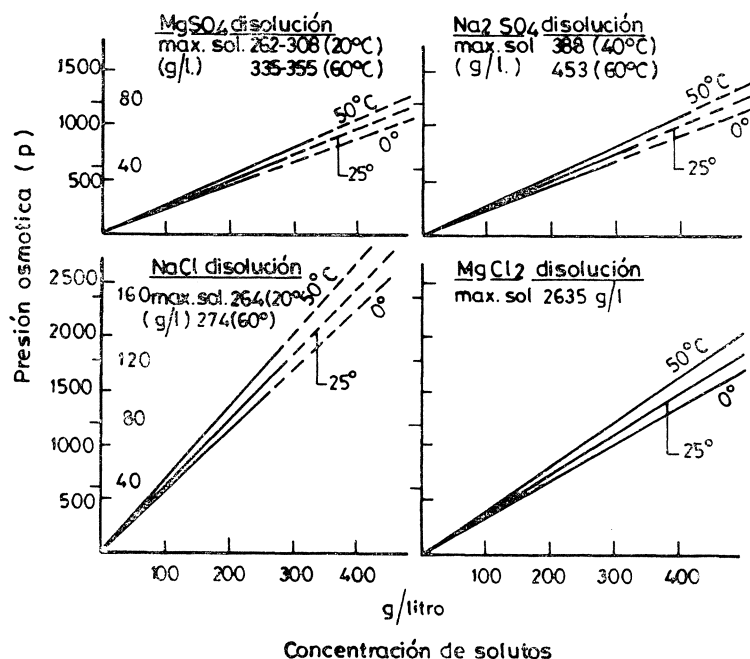


Fig. III-2.—Presión osmótica de algunas sales, según WINKLER.

Desde el punto de vista práctico y experimental, la determinación de la presión osmótica en los materiales de construcción encierra una gran dificultad, ya que está interferida por diversas presiones tales como las debidas a los cambios de volumen de agua contenida en los poros, a la presión de cristalización y a la presión de hidratación de las sales.

Independientemente de esta clase de interferencias intervienen la temperatura de los materiales, los cambios bruscos de ésta, y la concentración salina del agua que colmata los poros.

En realidad las gráficas expuestas proporcionan una indicación teórica del valor máximo que puede adquirir la presión osmótica.

2.1. Temperatura de los materiales

Los materiales de construcción, dispuestos en los paramentos vistos, o en las fachadas de los edificios, pueden llegar en las ciudades a adquirir la temperatura de 50°C.

En la figura III-3, debida a ROTH'S (4) se indica el gradiente de la temperatura en el interior de una roca de granito, durante un día de verano, dispuesta en la fachada de un edificio. Se comprueba que la temperatura alcanzada por el material en la superficie es aproximadamente un 30 % más elevada que la máxima del medio ambiente que rodea al material.

Es obvio, por razones de absorción luminosa, que la tonalidad de la roca interviene de modo primordial, y así los materiales oscuros, tales como los gabros y mármoles negros adquieren temperaturas del orden de un 60 % más elevada que la del aire circundante.

2.2. Concentraciones salinas

El grado de concentración salina de las disoluciones que ocupan los sistemas porosos o los poros alveolares no es muy conocido. El investigador KAISER (5) ha establecido que dichas concentraciones no alcanzaban el valor del 5 %, encontrándose, por consiguiente, muy lejos de los límites de solubilidad.

Como regla general se debe aceptar que la presión osmótica no afecta a los materiales de construcción cuando se hallan inalterados, o calificados de aptos para la construcción. Sin embargo, recientes trabajos de investigación, debidos a HEIDECKER (6), han permitido llegar a la conclusión que en las zonas alteradas de las rocas, por ejemplo, en las costras superficiales de ciertos materiales pétreos con síntomas evidentes de descomposición, la presión osmótica puede adquirir valores del orden de las 100 atmósferas. La formación de tales costras es una prueba inequívoca de alteración, conocida vulgarmente como "lepra de la piedra".

Existen determinadas rocas o materiales completamente sanos, que presentan características singulares para originar zonas osmóticas, tales como ciertas rocas ígneas alteradas, numerosas calizas y los hormigones. El científico LIESEGANG considera que en algunas

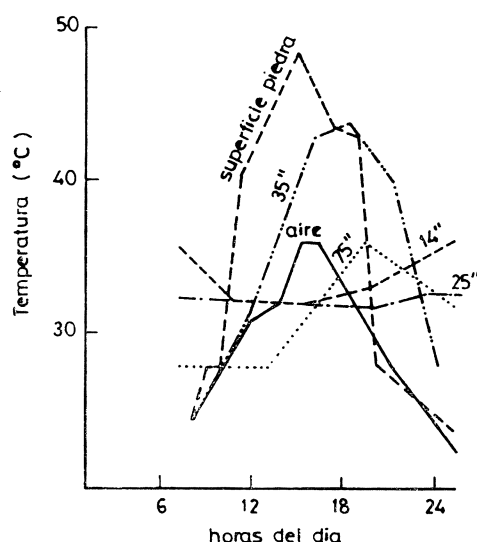


Fig. III-3.—Temperaturas durante el día y su distribución. Observar que la temperatura de la roca excede la del aire.

rocas ígneas alteradas, la sílice y la alúmina originan geles, que actúan como membranas semipermeables dando lugar a fenómenos de precipitación rítmica con la consiguiente formación de costras superficiales, que poco a poco van desprendiéndose.

En algunas rocas carbonatadas, sobre todo dolomíticas, se han encontrado poros aislados, que en su interior contenían disoluciones concentradas de sales cálcicas y magnésicas, pero desde el punto de vista petrográfico, resulta improbable que la presión osmótica desarrollada pueda llegar a alcanzar valores destructivos.

El “agua polarizada” y el cambio iónico superficial pueden motivar condiciones osmóticas en ciertas margas, pizarras y esquistos, e incluso, parece ser que la ósmosis interviene de modo fundamental en la formación de suelos y arcillas.

El entumecimiento o hinchamiento típico de las arcillas se debe a que retienen agua sobre la superficie de sus partículas con una fuerza de adherencia tan grande, que se estructura formando microporos del orden de 10 milimicras. Esta rigidez tan fuerte del agua polarizada hace que se comporte como una auténtica membrana iónica. El “agua polarizada” es más densa y viscosa que el agua ordinaria e, incluso, no se hiela hasta -40°C . La succión tiene lugar en las áreas de alta concentración iónica, sobreviniendo entonces una dilución y el inmediato hinchamiento del sistema suelo-agua.

Las arcillas suelen encontrarse ocluidas o formando estratos en las rocas de naturaleza dolomíticas.

Los suelos formados sobre las rocas carbonatadas están constituidos por todos los residuos insolubles o arcillosos de este tipo de rocas. Entre los distintos tipos de arcillas las “montmorillonitas” son las que mayor capacidad tienen para manifestar fenómenos de entumecimiento.

3. FORMACIONES SALINAS SUPERFICIALES

3.1. Eflorescencias

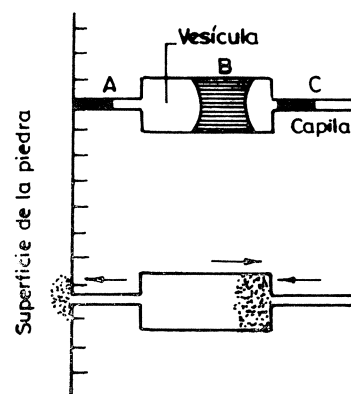
Las eflorescencias están formadas por depósitos salinos que acostumbran a formar manchas, salpicaduras y rebordes, sobre los materiales de construcción.

Su formación se debe a un proceso de cristalización, en la superficie de los sistemas capilares abiertos, de las sales solubles transportadas por la humedad en su movimiento hacia el exterior.

El mecanismo de las eflorescencias ha sido perfectamente esquematizado por LAURY y MILNE (7), figura III-4. El desplazamiento del líquido está indicado por los vectores, y se desplaza desde los capilares hacia una vesícula y desde ésta a la superficie.

Las eflorescencias no suelen causar daños a los materiales de construcción, pero influyen en sus cualidades estéticas. Por otra parte las formaciones salinas superficiales proporcionan información acerca de la emigración salina y del nivel superior alcanzado por la humedad.

Por lo general, los paramentos de ladrillo presentan este fenómeno de una forma clara, debido al contraste del color blanco de las sales con el rojo del material. Las eflorescencias de los ladrillos se deben a los sulfatos procedentes de los combustibles uti-



Mecanismo de las eflorescencias

Fig. III-4.—Según LAURY y MILNE (1926).

lizados en el proceso de cocción. LAMAR y SCHRODE (8) comprobaron que las sales solubles se componían principalmente de sulfato cálcico y magnésico.

En los edificios de piedra el mortero de las juntas de unión y la humedad del suelo contribuyen a incrementar las sales solubles.

3.2. Subeflorescencias

En los climas desérticos y urbanos húmedos suele aparecer el fenómeno de las subeflorescencias, que puede considerarse íntimamente relacionado con las eflorescencias.

Las sales se mueven hacia la superficie del material, como en el caso de las eflorescencias, pero no llegan a alcanzar la superficie y cristalizan debajo de ésta, originando una zona de alteración constituida por sustancias pulverulentas y poco adherentes. Con el tiempo esta costra pierde su soporte y se desprende en forma de cascarilla.

Las subeflorescencias son más temibles que las eflorescencias, pues mientras que éstas son visibles y permiten estudiar la acción de la humedad, la presencia de las subeflorescencias no se manifiestan hasta el desprendimiento del material.

4. PROCESOS DE CRISTALIZACION

Las sales, durante el proceso de su cristalización, originan acciones expansivas, debidas a presiones de formación y crecimiento, así como de hidratación y dilatación térmica, creando tensiones en el seno de los materiales de construcción.

4.1. Presión de cristalización

La formación de cristales a partir de las disoluciones produce presiones, debidas al crecimiento de los gérmenes cristalinos en el interior de los poros capilares, que pueden llegar a motivar su rotura.

CORRENS (9) ha establecido una expresión, basada en el Principio de RIECKE, según el cual un cristal sometido a una presión presenta una solubilidad mayor que cuando no sufre tensión alguna:

$$P = \frac{R \cdot T}{V_s} \cdot \ln \frac{C}{C_s}$$

en la que:

P = Presión de crecimiento del cristal, en atmósferas.

R = Constante universal de los gases = 0,082 litros · atm/°K · mol.

T = Temperatura, en °K.

V_s = Volumen molecular de la sal en estado sólido.

C = Concentración del soluto durante la cristalización.

C_s = Concentración del soluto a saturación.

Es condición indispensable para que exista una cristalización que la disolución esté sobresaturada.

En la figura III-5, debida a MULLIN (10), se ha expresado la temperatura, T , de la disolución en abscisas y la relación C/C_s en ordenadas. En la gráfica pueden darse los siguientes casos teóricos:

1.º Cambio de temperatura a concentración constante

La concentración permanece constante y la temperatura desciende desde A a B, como sucede en los ciclos diarios. En este caso, después de atravesar la zona de saturación se alcanza la línea de sobresaturación crítica y se origina una cristalización. Cuanto más elevada sea la concentración de la disolución, más rápida es la cristalización y mayores los cristales.

2.º La concentración aumenta y la temperatura permanece constante

La concentración se traslada desde A hasta C. Este caso suele darse en los capilares finos, en tiempo seco. Aunque también puede originarse una dilución en presencia de lluvia.

3.º La concentración y la temperatura varían

La concentración se traslada desde A hasta D alcanzando la sobresaturación crítica y la oportuna cristalización.

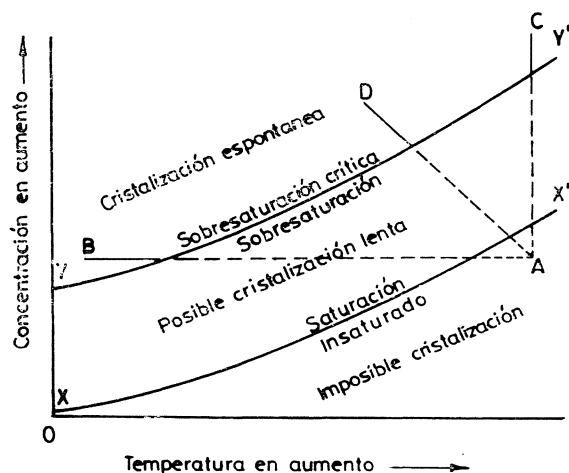


Fig. III-5.—Presión de cristalización.

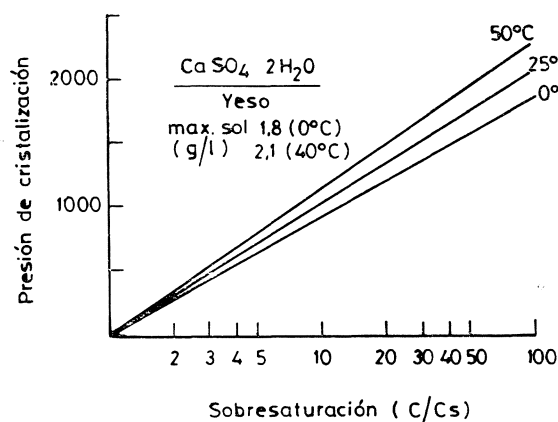


Fig. III-6.

Los investigadores WINKLER y SINGER, mediante la expresión de CORRENS han trazado la gráfica de la figura III-6 para el caso del yeso. Los valores de sobresaturación se han expresado en abscisas a escala logarítmica, y la presión originada por el crecimiento del cristal se expresa en ordenadas.

Conforme puede comprobarse la relación es lineal para una temperatura dada.

4.2. Presión de cristalización

Ciertas sales manifiestan características higroscópicas, es decir, son capaces de hidratarse y deshidratarse de acuerdo con las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa.

El fenómeno de higroscopicidad implica una absorción de agua y un aumento de volumen, originando presiones en las paredes de los poros y capilares.

El primer investigador que estudió la influencia de este tipo de sales en la alteración ambiental de las rocas fue MORTENSEN (11).

Actualmente en los grandes núcleos urbanos modernos se ha detectado la presencia de sales higroscópicas en los materiales de construcción de edificios y monumentos, procedentes de la atmósfera contaminada, de los morteros de las juntas de unión, o aportadas por corrientes de agua freática.

Los estudios realizados por WINKLER y WILHEM (12) les ha permitido establecer una expresión para determinar la presión de hidratación de una sal:

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V_n - V_a} \cdot 2,3 \log \frac{P_w}{P_{w'}}$$

en la que:

P = Presión de hidratación, en atmósferas.

R = Constante = $2,07 \text{ ml} \cdot \text{atm/mol} \cdot ^\circ\text{K}$.

T = Temperatura en $^\circ\text{K}$.

V_n = Volumen molecular de la sal hidratada, en cm^3 .

V_a = Volumen molecular de la sal primitiva, en cm^3 .

P_w = Presión de vapor de agua, en mm Hg, a la temperatura dada.

$P_{w'}$ = Presión de vapor de la sal hidratada, en mm Hg a temperatura dada.

BIBLIOGRAFIA

- (1) R. M. GARRELS: Geolog. Soc. America Bull. (1949).
- (2) R. E. LIESEGANG: Chimie der Erde (1945).
- (3) B. H. MAHAN: Elementary Chemical Thermodynamic. Benjamin Inc. Amsterdam (1964).
- (4) E. S. ROTH: Journal Geology (1965).
- (5) E. KAISER: Chimie der Erde (1929).
- (6) E. HEIDECKER: Proc. Australian Inst. Mining and Metallurgy (1968).
- (7) A. P. LAURY: Proc. Royal Soc. of Edimburgh (1926).
- (8) J. E. LAMAR: Economic Geology (1953).
- (9) C. W. CORRENS: Discussions of the Faraday Society (1949).
- (10) J. W. MULLIN: Crystalization. 9 Ed. Butterworths (1961).
- (11) H. MORTENSEN: Petermann's Geographische Mitteilungen (1933).
- (12) E. M. WINKLER: Geolog. Soc. American Bull. (1970).